

基于整数小波变换和 SPIHT 编码的录波数据压缩算法

王永玉¹, 孙衢², 袁超伟¹

(1. 北京邮电大学通信网络综合技术研究所, 北京 100876; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出了基于整数小波变换和多级树集合分裂 SPIHT (Set Partitioned in Hierarchical Tree) 编码的电力系统录波数据压缩方法。首先对故障录波数据进行整数小波变换, 再对变换后系数量化, 然后进行一维 SPIHT 编码形成嵌入式码流, 便于系统根据通讯线路的负荷情况灵活控制传输码率。整数小波变换运算速度快, 节约内存, 易于 DSP 实现。SPIHT 编码方法形成的码流易于实现可变码率。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 整数小波变换; SPIHT 算法; 数据压缩

Power system fault recording data compression based on IWT and SPIHT coding

WANG Yong-yu¹, SUN Qu², YUAN Chao-wei¹

(1. School of Telecommunication and Network Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A new compression method of fault recording data in power systems based on Integer Wavelet Transform (IWT) and Set Partitioned in Hierarchical Tree (SPIHT) coding is presented. Firstly, IWT is employed to decompose the fault recording data. Then, SPIHT coding method is used to create an embedded bit stream, which can be truncated to achieve a desired bit rate according to different communication conditions. By adopting IWT, the computing time is reduced, the requirement of memory is less, and it is easier to realize with DSP. By using SPIHT coding, an embedded coding stream of variable bit rate is easily generated. The simulation test shows that the method proposed has a good compression rate and high performance.

This paper is supported by Grand Project of National Natural Science Foundation of China(No.50595412).

Key words: IWT(integer wavelet transform); SPIHT (set partitioning embedded block coder); data compression

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)11-0050-05

0 引言

现代电力系统故障诊断、广域保护和稳定分析的研究愈加依赖于电网动态监测系统采集的、含丰富故障信息的暂态过程信号。故障暂态过程信号是一非平稳信号, 记录这一非平稳信号需较高的采样率, 其数据量大。向调度中心上传占用数据通道时间长, 特别是当多个站点同时上传数据时容易造成数据通道阻塞。因此, 寻求一种有效的记录和压缩电力系统故障暂态数据方案仍具有重要的现实意义。基于小波变换的数据压缩算法具有较高的压缩比。近年来, 离散小波变换(DWT)在电力系统故障数据压缩中的应用取得一些进展^[1~11]。

基于小波的嵌入式编码技术(如 Embedded Zerotree Wavelet coding, EZW^[12]以及 Set Partitioned in Hierarchical Tree, SPIHT^[13])易于实现嵌入式码流, 可实现图像的渐进式传输, 因此在图像压缩领域得到了广泛的应用和研究。文献[14,15]将基于提升格式的 9/7 整数小波与 SPIHT 编码相结合, 并根据图像相邻系数的相关性对 SPIHT 编码算法进行改进, 应用于含有丰富高频信息的图像压缩获得了较好的效果; 文献[16]将小波包与 SPIHT 编码相结合应用于纹理丰富的图像压缩从而获得了改进的图像重构质量。本文研究了基于提升格式的 4/2 整数小波变换与 SPIHT 编码方法相结合应用于电力系统故障录波数据压缩的方法, 与文献[19]相比, 在相同压缩比下, 信噪比有所提高, 同时实现了压缩数据的可变码率。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50595412)

1 提升格式小波变换的整数算法

1996年, Sweldens 等人提出了一种新的构造小波的方法—提升方法^[17]。提升格式小波(又称为第二代小波)的构造完全在时域内进行, 无需经过傅立叶变换; 二代小波不一定是由某一个母小波通过膨胀和平移得到的, 它们的定义非常灵活; 而且二代小波还有一个特点就是还可以包容传统小波, 也就是说所有的传统小波都可以由提升方法构造出来。并且采用提升方法实现小波滤波还具有如下优点: 运算速度快, 不需要额外的内存, 可以实现整数小波变换 IWT (integer wavelet transform) 等。

1.1 提升格式小波的构造

由提升方法构成的小波变换过程可分为 3 个步骤: 分裂(split)、预测(predict) 和更新(update)。

(1) 分裂(split): 此过程将数据集(原始信号) $s_j (j \in Z)$ 分裂成两个较小的子集 s_{j-1} 和 d_{j-1} , d_{j-1} 也称为小波子集, 即 $\text{Split}(s_j) := (\text{even}_{j-1}, \text{odd}_{j-1}) = (s_{j-1}, d_{j-1})$ 。

(2) 预测(predict): 基于原始数据的相关性, 构造算子 P , 用偶数序列 s_{j-1} 去预测奇数序列 d_{j-1} 。并用奇数序列与预测值之差替代奇数序列, 即 $d_{j-1} := d_{j-1} - P(s_{j-1})$ 。 P 为预测算子, 一般通过插值细分方法构造, 常用方法有线性插值与立方插值。细节系数越小, 预测越精确。

(3) 更新(update): 更新的基本思想是找出一个更好的子数据集 s_{j-1} , 使之保持原始数据集 s_j 的一些特性 $Q(\cdot)$, 如均值、能量、消失矩等不变, 即 $Q(s_{j-1}) = Q(s_j)$ 。在更新过程中构造一个算子 U 去更新 s_{j-1} , $s_{j-1} := s_{j-1} + U(d_{j-1})$ 。实际上是使用 d_{j-1} 附近几点来改善 s_{j-1} 使其低频性质不变。

1.2 提升格式小波的整数实现

Sweldens 等人基于提升框架提出了一种 IWT 模式即整数小波^[18]。它具有如下特点: ①变换后的系数是整数, 运算速度快; ②计算时能最小限度地利用存储器; ③能方便地实现可逆变换; ④不依赖傅立叶变换, 能保证重构, 简单可靠; ⑤同时继承了传统小波变换的多分辨率等特征; ⑥易于硬件实现。

这种 IWT 没有改变提升结构, 其实现整数输出的关键是对每个提升步骤中的预测表达式和更新表达式进行截断(取整)操作, 这种截断(取整)操作完全可以保证信号经过每一个提升步骤后输出

的结果均为整数。则提升格式小波变换的整数实现为:

$$\text{分解: } \begin{cases} \text{split}(s_j) := (s_{j-1}, d_{j-1}) \\ d_{j-1} := d_{j-1} - \lfloor P(s_{j-1}) \rfloor \\ s_{j-1} := s_{j-1} + \lfloor U(d_{j-1}) \rfloor \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{重构: } \begin{cases} s_{j-1} := s_{j-1} - \lfloor U(d_{j-1}) \rfloor \\ d_{j-1} := d_{j-1} + \lfloor P(s_{j-1}) \rfloor \\ s_j := \text{merge}(s_{j-1}, d_{j-1}) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\lfloor \bullet \rfloor$ 表示截断(取整)过程。

本文采用适合大多数录波数据的 CDF4/2 双正交小波, 其提升格式的整数实现为^[18]:

$$\begin{cases} d_{j-1,k} = s_{j,2k+1} - \left[\frac{9}{16}(s_{j,2k} + s_{j,2k+2}) - \frac{1}{16}(s_{j,2k-2} + s_{j,2k+4}) + \frac{1}{2} \right] \\ s_{j-1,k} = s_{j,2k} + \left[\frac{1}{4}(d_{j-1,k-1} + d_{j-1,k}) + \frac{1}{2} \right] \end{cases} \quad (3)$$

2 基于整数小波变换和 SPIHT 编码的录波数据压缩算法

本文采用嵌入式 SPIHT 编码方法对电力系统故障数据压缩。嵌入式编码就是编码器将待编码的比特流按重要性的不同进行排序, 根据目标码率或失真度大小要求随时结束编码; 同样, 对于给定码流解码器也能够随时结束解码。同其他编码方法相比, 嵌入式编码压缩能力高, 而且能够轻易实现可变码率。这个特性使得故障记录与传输系统可以根据通讯线路的负荷情况灵活控制传输码率。目前应用较为普遍的嵌入式编码方法有 EZW, SPIHT 以及 SPECK(Set Partitioned Embedded Block Coding)。

2.1 多级树集合分裂(SPIHT)编码

Shapiro 首次提出了二维图像的小波零树嵌入编码(EZW)算法^[12]。后来 A.Said 和 W.A.Pearlman 在 EZW 算法的基础上给出了更为精细的 SPIHT 算法^[13], 进一步提高了编码效率。SPIHT 算法在不同比特率下的信噪比都比 EZW 算法有所提高。SPIHT 借助 3 个链表 LIP(list of insignificant pixel), LSP(list of significant pixel), LIS(list of insignificant set)提高效率。

2.2 SPIHT 编码的一维实现

EZW 和 SPIHT 算法最初是针对二维图像压缩的编码方法, 在对一维数据进行小波变换后发现,

一维数据的小波域同样存在大量的一维零树, 因此可以将其推广到一维数据的压缩中。下面首先定义一维信号小波系数的树结构, 然后给出录波数据多级树集合分裂小波嵌入编码算法。以 32 点信号为例, 信号进行五层整数小波分解后各点的父-子关系如图 1 所示, $C[n]$ 为小波变换后各点系数。

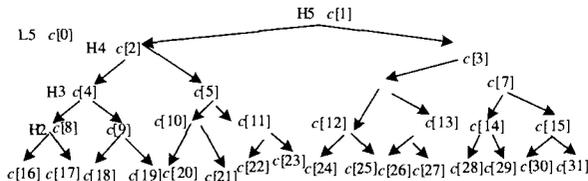


图 1 32 点小波系数的树形结构图

Fig. 1 Trees of wavelet coefficients

首先给出 SPIHT 算法中将要用到的一些集合的表示方法: $O(i)$, 节点 i 的直接后代节点坐标集合, 除了最低频子带和最高频子带, 都有如下关系: $O(i) = \{2i, 2i + 1\}$ 。 $D(i)$, 节点 i 的所有后代节点坐标集合。 $L(i) = D(i) - O(i)$ 表示小波系数点 i 除子代外的所有后代。 LIS, 不重要集合表; LSP, 重要系数表; LIP, 不重要系数表。类型 A, 在 LIS 中代表 $D(i)$; 类型 B, 在 LIS 中代表 $L(i)$ 。对于一个给定的门限 T , 如果 $c[i] < T$, 则称小波系数 $c[i]$ 是不重要系数; 否则称 $c[i]$ 是重要系数。

SPIHT 算法的一维实现过程如下:

1) 初始化: 确定初始量化门限 T ; 初始化 LSP、LIP 和 LIS, 将所有的树根节点置入 LIP 中(例如图 1 中 $c[0], c[1]$ 点记作 $\{(0), (1)\}$); 将树根中有后代的置入 LIS 中, 作为 A 型值(如图 1 中 $c[1]$ 点, 记作 $\{(1, A)\}$); 清空 LSP。

2) 排序过程: 对于 LIP 链表中的每个元素, 对应给定的量化门限 T 进行重要性检测, 若重要, 编码每个系数的符号和最高有效位, 并将其转移到 LSP 链表中。接着对 LIS 链表中的元素进行重要性检测, 对重要元素的确定主要是通过空间方向树的多次分裂来实现的。先检测 A 型值, 也就是集合 $D(i)$ 的重要性, 若不重要, 则用一个符号就可以表示该集合; 若 $D(i)$ 是重要的, 则 $D(i)$ 继续分裂成 $O(i)$ 和 $L(i)$ 。对 $O(i)$ 中的两个元素分别进行重要性检测, 把重要的移入 LSP 中, 把不重要的移入 LIP; 再检测集合 $L(i)$ 的重要性, 若不重要, 则用一个符号就可以表示该集合; 若重要则继续分裂, 并相应更新 LIP 和 LSP 链表。

3) 细化过程: 对 LSP 的每个元素(不包括在本次排序过程新加入 LSP 表的元素), 输出其在该级编码平面的值。

4) 量化门限更新: $T = T/2$ 转到 2) 进行下一级编码。一旦编码输出比特数达到给定值, 或量化门限小于给定值, 可以直接中止编码过程, 从而可以实现精确的码率控制。

2.3 录波数据压缩算法

本文提出的录波数据压缩算法由以下几个步骤组成:

①对故障录波数据进行五层整数小波分解, 所采用小波基的提升格式的整数实现由式 (3) 给出。

②对小波变换后的系数进行阈值量化, 本文采用与文献[19]相同的尺度相关的阈值选择算法, 首先计算每个尺度上需要保留的系数个数:

$$n_j = M(L - j)^\alpha \quad (4)$$

其中: L 为尺度总数; M 为最粗尺度上需要保留的系数个数; α 取 1.5。在每个尺度上 n_j 个最大的系数被保留, 其余小系数被置为 0。

③对阈值处理后的小波系数按照上一节给出的 SPIHT 编码方法进行编码。

3 仿真结果

采用本文所提出的压缩方案对多种故障录波信号进行仿真, 数据由 EMTP 仿真得到。首先采用与文献[19]相同的算例, 用 EMTP 仿真一条存在单相接地故障的 750 kV、480 km 传输线, 故障点仅发生微弱波形畸变, 采样频率为 50 kHz。图 2 给出了 B 相电压信号及其小波分解。

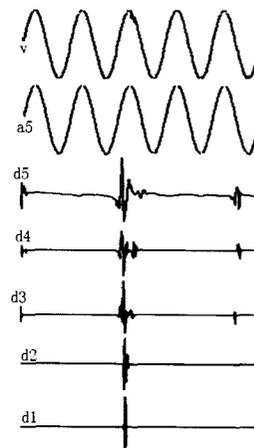


图 2 电压信号及其小波分解

Fig. 2 Waveforms of the voltage and wavelet coefficient

在仿真中, 首先将 5 层小波分解系数全部编码到比特流中。在解码端依次增加解码数据长度 (即压缩比不断减小), 并计算相应的性能指标。压缩比及信噪比的计算公式如式 (5)、(6)。

$$\text{压缩比} = \frac{\text{原始数据长度}}{\text{解码数据长度}} \quad (5)$$

$$\text{信噪比} = 10 \log \frac{\sum_{k=0}^{N-1} f_k^2}{\sum_{k=0}^{N-1} (f_k - x_k)^2} \quad (6)$$

其中: f_k 为原始信号数值, x_k 为重构信号数值, N 为信号长度。图 3 给出了在不同压缩比下的信噪比。

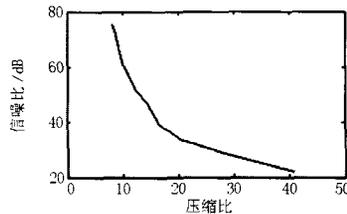


图 3 不同压缩比下的信噪比

Fig. 3 SNR under different compression ratio

文献[19]中,压缩比为 17.8,信噪比为 31.5 dB;采用本文方法在此压缩比下信噪比为 39 dB,比文献[19]提高 7.5dB。采用本文方法在相同压缩比下信噪比有所提高。

其次,采用 EMTP 仿真 500 kV 输电线路发生单相接地故障,故障点发生剧烈波形畸变。图 4 为故障相电压采样信号,图 5 给出压缩比为 17.8 时解码后的重构信号,图 6 给出压缩比为 17.8 时的重构误差信号,图 7 给出压缩比为 30 时解码后的重构信号,图 8 给出压缩比为 30 时的重构误差信号。

实际应用中,在数据采集与压缩终端可将小波分解系数全部编码到比特流中(此时压缩比最小,失真度最小)。而数据的上传可根据线路通信状况灵活控制:当线路通信状况良好时,可传输全部或大部分比特流,此时压缩比不高,解码后数据失真度较低(如图 5);而当线路通信负荷过重,则可传输小部分比特流,此时压缩比很高,解码后数据保真度有所降低(如图 7)。采用嵌入式 SPIHT 编码的优势就是可一次编码,根据通信状况传输给定的码流,随时截断都可进行解码。

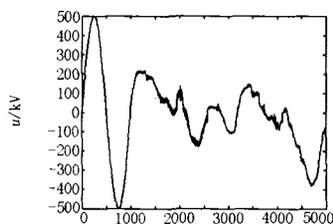


图 4 压缩前故障电压波形

Fig.4 The original waveform of fault voltage

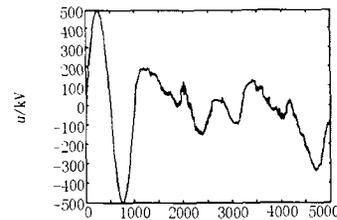


图 5 压缩比为 17.8 时重构的故障电压波形

Fig.5 The reconstruction of fault voltage(CR=17.8)

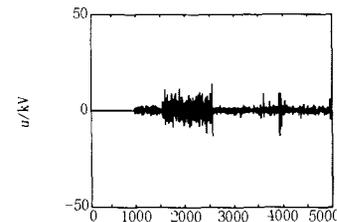


图 6 压缩比为 17.8 时重构误差波形

Fig.6 The difference between the source wave and the wave

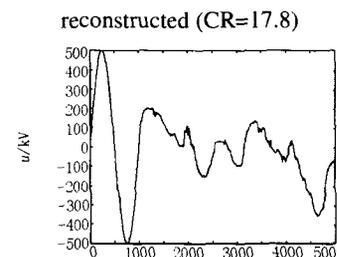


图 7 压缩比为 30 时重构的故障电压波形

Fig.7 The reconstruction of fault voltage(CR=30)

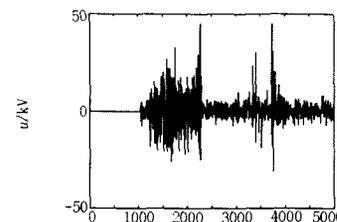


图 8 压缩比为 30 时重构误差波形

Fig.8 The difference between the source wave and the wave reconstructed (CR=30)

4 结论

本文采用了提升格式的小波变换的整数算法来实现录波数据压缩,采用提升格式,计算时能最大限度地利用存储器,计算速度快;采用整数变换,可直接实现整数到整数的变换,在实际应用中可直接计算 A/D 采样后的整数数据,节省计算时间,并且易于硬件实现;同时采用了嵌入式 SPIHT 编码算法,压缩后数据形成嵌入式码流,能够根据实际通信线路的状况来灵活地控制传输码率。

参考文献

- [1] 闫常友, 杨奇逊, 刘万顺. 基于提升格式的实时数据压缩和重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9):6-10.
YAN Chang-you, YANG Qi-xun, LIU Wan-shun. A Real-time Data Compression & Reconstruction Method Based on Lifting Scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9):6-10.
- [2] 刘志刚, 何正友, 钱清泉. 基于最优预处理方法的多小波故障数据压缩方案[J]. 电网技术, 2005, 29(11):40-43.
LIU Zhi-gang, HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. A Fault Signal Data Compression Plan Based on Optimal Pre-processing Method of Multiwavelet[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 40-43.
- [3] 曾怡达, 刘志刚, 钱清泉. CL 多小波预处理方法在故障数据压缩中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(7):10-14.
ZENG Yi-da, LIU Zhi-gang, QIAN Qing-quan. Pre-processing Method of CL Multiwavelet and Their Applications in Power System Fault Data Compression[J]. Power System Technology, 2004, 28(7):10-14.
- [4] 张昊, 刘沛. 基于双正交小波的电力系统故障录波数据压缩[J]. 电网技术, 2000, 24(11):42-45.
ZHANG Hao, LIU Pei. Bi-orthogonal Wavelet Based Data Compression Algorithm for Power System Fault Recorder[J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 42-45.
- [5] 刘志刚, 钱清泉. 基于多小波的电力系统故障暂态数据压缩算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 22-26.
LIU Zhi-gang, QIAN Qing-quan. Compression of Transient Data in Electric Power System Based on Multiwavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 22-26.
- [6] 欧阳森, 宋政湘, 陈德桂. 基于小波原理的电能质量检测数据实时压缩方法[J]. 电网技术, 2003, 27(2):37-40.
OUYANG Sen, SONG Zheng-xiang, CHEN De-gui. A Wavelet Theory Based Real-time Data Compression Method for Power Quality Detection[J]. Power System Technology, 2003, 27(2):37-40.
- [7] 任震, 何建军, 黄雯莹. 基于小波包算法的电机故障信号的压缩和重构[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 25-29.
REN Zhen, HE Jian-jun, HUANG Wen-ying. Compression and Reconstruction for Faults Signals of Electric Machines Based on Wavelet Packets[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 25-29.
- [8] 何正友, 钱清泉, 刘志刚. 一种基于优化小波基的电力系统故障暂态数据压缩方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6):1-5.
HE Zheng-you, QIAN Qing-quan, LIU Zhi-gang. An Electric Power System Fault Transient Data Compression Method Based on Optimal Wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 1-5.
- [9] Shang L, Aeger J, Krebs R. Efficiency Analysis of Data Compression of Power System Transients Using Wavelet Transform[A]. In IEEE Conference on Power Tech[C]. Bologna(Italy): 2003.
- [10] 李鹏, 杨洪耕, 孔飘红. MDL 判据在电能质量扰动信号数据压缩中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 48-52.
LI Peng, YANG Hong-geng, KONG Piao-hong. Application of Minimum Description Length Criterion in Data Compression of Power Quality Disturbance Signal[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 48-52.
- [11] 胡国胜, 任震, 黄雯莹. 基于最小带宽离散小波的故障信号消噪与压缩[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11).
HU Guo-sheng, REN Zhen, HUANG Wen-ying. Fault Signals Denosing and Compression Based on MBDW Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1).
- [12] Shapiro J M. Embedded Image Coding Using Zero Trees of Wavelet Coefficients[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(12):3445-3462.
- [13] Said A, Pearlman W A. A New, Fast, and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3):243-250.
- [14] 陈红新, 刘正光, 张宏伟, 等. 基于提升小波的 SPIHT 改进算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(6):1362-1364.
CHEN Hong-xin, LIU Zheng-guang, ZHANG Hong-wei, et al. Improvement of SPIHT Algorithm Based on Lifting Scheme[J]. Computer Applications, 2006, 26(6):1362-1364.
- [15] 高尚兵, 张建伟. 基于 9-7 整数小波变换的 SPIHT 的改进[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(5):884-886.
GAO Shang-bing, ZHANG Jian-wei. Improvement of SPIHT Based on 9-7-tap Integer Wavelet Transform[J]. Computer Engineering and Design, 2006, 26(6):1362-1364.
- [16] 王爱丽, 杨明极. 基于小波包的 SPIHT 算法图像压缩[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(5):72-75.
WANG Ai-li, YANG Ming-ji. A Novel Algorithm of SPIHT Image Compression Based on Wavelet Packet[J]. Journal of Harbin University Science & Technology, 2006, 11(5):72-75.
- [17] Sweldens W. The Lifting Scheme: A Custom-design Construction of Biorthogonal Wavelets[J]. Appl Comput Harmon Anal, 1996, (3): 186-200.
- [18] Calderbank A R, Daubechies I, Sweldens W, et al. Wavelet Transforms That Map Integers to Integers[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1998, 31(5): 332-369.

(下转第 61 页 continued on page 61)

我们在对其二次回路合闸部分进行了改造之后做了大量的试验,分别模拟了各种常见异常情况下的开关合闸试验,该继电器在各种情况下均成功地断开了合闸回路,有效地避免了线圈的烧毁。试验表明通过回路改造,能够真正降低 10 kV 断路器合闸线圈的损坏频数。

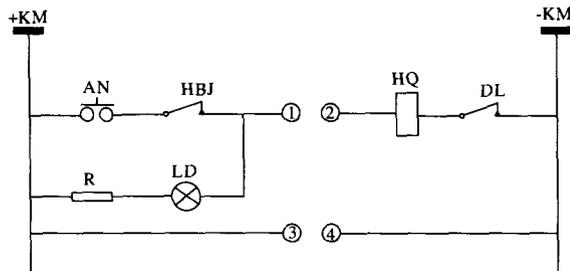


图5 改造后的控制回路原理图

Fig.5 Diagram of the changed control-circuit

5 结论

目前,电力系统还有许多这样的微机保护正在运行,如果不改造,将对电力安全生产造成很大的安全隐患,每年烧毁大量的合闸线圈,造成物资和人力维护成本的极大浪费,并且不能为用户按时保证质量地可靠供电。而在现有设备的基础上进行回路改造,仅有一个时间继电器、光耦和一些简单配线,把这些融入到一个综合继电器内,施工安全性高,耗资很小。目前,正在运行的微机保护合闸控制回路按照本文提出的方法对其进行改造,将会大大改善设备的性能,消除设备故障隐患。此设计可以运用到跳闸回路中,有效防止跳闸线圈的烧毁。并且此技术设计改造同样可以运用到 35 kV 线路保护中,提高 10~35 kV 配网运行的可靠性,其经济效益和社会效益都是巨大的。

参考文献

- [1] 朱声石. 继电保护原理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
ZHU Sheng-shi. Relay Protection Theory and Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics

Industry, 2000.

- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. The Relay Protection Principle of Electric Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [3] 韩天行. 微机型继电保护及自动化装置检验调试手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
HAN Tian-xing. The Tiny Model Protects After the Electricity and the Sutomation Equip Examination to Adjust to Try the Manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [4] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护技术问答(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
State Electric Power Dispatching Communication Center. Electric System Relaying Technology Dialogue (Second Edition)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [5] 贺家李. 电力系统继电保护技术的现状与发展[J]. 中国电力, 1999, 32(10): 38-40.
HE Jia-li. Current Situation and Development of Relay Protection of Power System Technology[J]. Electric Power, 1999, 32(10): 38-40.
- [6] 周玉兰, 詹荣荣, 舒治雅, 等. 2003 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况与分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 51-56.
ZHOU Yu-lan, ZHAN Rong-rong, SHU Zhi-ya, et al. Statistics and Analysis of Operation Situation of Protective Relaying and Automation Devices of Power Systems in China in 2003[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 51-56.

收稿日期: 2007-10-10; 修回日期: 2007-12-04

作者简介:

李兵(1980-), 男, 助理工程师, 主要从事继电保护运行与维护工作; E-mail: libing1234933@sohu.com

库永恒(1980-), 男, 助理工程师, 主要从事继电保护运行与维护工作;

马云龙(1973-), 男, 工程师, 主要从事继电保护运行与维护工作。

(上接第54页 continued from page 54)

- [19] 任明明, 张彦斌, 贾立新. 一种基于提升小波和零树编码的录波数据压缩算法[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(4): 494-496.
REN Ming-ming, ZHANG Yan-bin, JIA Li-xin. Compression Method Based on Lifting Wavelet Transform and Embedded Zerotree Coding[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(4): 494-496.

收稿日期: 2007-08-13; 修回日期: 2007-10-09

作者简介:

王永玉(1973-), 女, 工程师, 研究方向为小波理论及应用, 信号处理与多媒体技术; E-mail: yongyuwang@sina.com

孙衢(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制, 智能方法及在电力系统中的应用。